苦竹叶片碳氮磷化学计量特征的海拔梯度效应

林 华[1]，谢燕燕[2]，杨丽婷[2]，陈双林[2]，郭子武[2]*

（1. 福建省沙县林业局，福建 沙县 365500；2. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所，浙江 杭州 311400）

摘要：为揭示海拔梯度对苦竹林立竹叶片 C、N、P 化学计量特征的影响，为苦竹林丰产培育提供参考。以 3 个海拔梯度 [低海拔，(200±10) m；中海拔，(400±10) m；高海拔，(800±10）m]苦竹林为研究对象，测定了 1-3 年生立竹叶片 C、N、P 含量，分析了其化学计量特征和异速增长关系。结果表明：立竹年龄对苦竹叶片 C、N、P 含量及其化学计量特征影响明显，随立竹年龄的增大，苦竹叶片 C、N、P 含量和 N:P 总体上均呈降低趋势，而 C:N、C:P 总体上呈升高趋势。海拔对苦竹叶片 C、N、P 含量及其化学计量特征有重要影响，随海拔梯度升高，不同年龄立竹叶片 C 含量呈先升高后下降变化趋势，N、P 含量总体上呈降低趋势，而 C:N、C:P 和 N:P 均呈升高趋势。不同海拔梯度苦竹林立竹叶片 C、N、P 含量和 C:N、C:P 差异显著，中、高海拔苦竹林立竹叶片 N:P 无显著差异，均显著高于低海拔苦竹林；不同海拔梯度苦竹林立竹叶片 C、N、P 间呈显著的正异速增长关系，随海拔梯度的升高，C-N、C-P 异速增长指数显著升高，而 N-P 异速增长指数显著下降。研究表明，高海拔苦竹林虽然 N、P 利用效率提高，但立竹叶片碳含量较低，P 素限制性作用增强；中海拔苦竹林不仅具有较高的 N、P利用效率，而且立竹叶片碳含量高，是苦竹林丰产培育的适宜海拔。

关键词：苦竹，海拔，主要养分，生态化学计量，异速增长

Concentration and its stoichiometry of leaf carbon, nitrogen and phosphorus of *Pleioblastus amarus* forest from different altitudinal gradients

LIN Hua[1], XIE Yanyan[2], YANG Liting[2], CHEN Shuanglin[2], GUO Ziwu[2*]

(1. *Forestry Bureau of Shaxian County*, Shaxian 365500, Fujian, China; 2. *Research Institute of Subtropical Forestry. CAF*, Hangzhou, 311400, China)

Abstract: To approach the influence of altitude on stoichiometry of leaf carbon, nitrogen and phosphorus of *Pleioblastus amarus*, the guidance of high-yield bamboo plantations cultivation of *P. amarus* forest is presented. We determined the concentration of leaf carbon, nitrogen and phosphorus for 1-3-year-old bamboo from stand at three different altitudinal gradients [Low altitude, (200±10) m； middle altitude (400±10) m； high altitude, (800±10) m], and analyzed their stoichiometries and allometric growth. Bamboo age had great influences on the concentration of leaf carbon, nitrogen and phosphorus and its stoichiometry. With increasing bamboo age, the concentration of leaf carbon, nitrogen and phosphorus and N:P ratios decreased overall, while ratios of C:N and C:P increased. Altitude had significant effects on the concentration of leaf carbon, nitrogen and phosphorus and its stoichiometry. With the increase of altitudinal gradient, leaf carbon increased remarkably and then deceased sharply, while leaf nitrogen and phosphorus decreased overall, and leaf C:N，C:P and N:P increased generally. Leaf N:P ratios of stand from the middle and high altitude were higher than that of the low altitude. There was significantly positive allometric growth between leaf carbon, nitrogen and phosphorus. With the increase of altitudinal gradient, allometric exponent for leaf C-N and C-P increased remarkably, but that for N-P decreased dramatically. The study has revealed that the *P. amarus* stand at the high altitude had the

收稿日期：2021-01-26

基金项目：“十三五”国家重点研发计划重点专项课题(2016YFD0600903) [Supported by the National Key Research and Development Program of China in “the 13th Five-Year Plan” (2016YFD0600903]。

作者简介：林 华(1965-)，教授级高工，主要从事竹林培育技术研究与推广，（E-mail）sxzuy@163.com。

***通信作者：**郭子武，博士，副研究员，硕士研究生导师，主要从事竹林生态与培育研究，(E-mail) hunt-panther@163.com。

highest utilization efficiency of N and P, but its carbon concentration was lower and P limitation increased. While the *P. amarus* stand at the middle altitude had the higher utilization efficiency of N, P and the highest carbon concentration, and therefore it is the preferred altitude of high-yield cultivation for *P. amarus* forest.

Keywords: *Pleioblastus amarus,* altitude, main nutrient, ecological stoichiometry, allometric growth

生态化学计量学主要用于探索生态过程和生态作用中能量变化、化学元素平衡及其影响(张婷婷等, 2019)，是当前生态学研究的热点之一(Allen & Gillooly, 2009; Amatangelo & Vitousek, 2008)。碳(Carbon, C)是植物体的结构性物质，主要来自于植物光合作用的碳固定。氮(Nitrogen, N)、磷(Phosphorus, P)是蛋白质和遗传物质的重要组成元素(Li et al., 2016)，主要来自于土壤，是植物良好生长和生产力发挥的重要限制因素(Elser et al., 2007)，通常植物的C储存在一定程度上受N、P可获得性限制(Güsewell et al., 2003; Tessier & Raynal, 2003)。因此，生态化学计量学研究主要集中于C、N、P元素的化学计量关系及其生态指示作用。海拔是重要的综合性地形因子，海拔的差异会引起气候因子、环境条件和土壤质地等发生明显的变化，如海拔升高会引起光照增强，导致气温、大气压及CO_2分压等下降(Körner, 2007; Read et al., 2014; Soethe et al., 2008)，土壤有机质增加，氮、磷含量降低等(区智等, 2014)，进而影响植物的功能性状、养分吸收与利用(姬明飞等, 2017)，致使植物主要养分元素化学计量特征产生明显的适应性调节(姬明飞等, 2017)。因此，研究不同海拔植物C、N、P化学计量特征及其相对增长关系，对于阐明海拔梯度上植物养分吸收、利用特性与循环特征等均具有重要的科学意义。

苦竹（*Pleioblastus amarus*）隶属禾本科竹亚科大明竹属，地下茎复轴混生型竹种，是优良的笋材兼用竹种，生态适应性较强，资源垂直分布特征明显(Guo et al., 2018)。苦竹的研究多集中于生长发育规律(方伟等, 2005)、生物量模型(郑容妹等, 2003)和器官养分分布格局(将俊明等, 2007)及密度制约规律(林华等, 2017)等方面，海拔梯度上苦竹的研究仅限于立竹叶片功能性状及其异速增长关系(Guo et al., 2018)、土壤养分化学计量特征(张亿艳, 2019)、竹笋品质与适口性差异(郭子武等, 2019)等，而苦竹叶片养分化学计量特征及其相对增长关系的海拔梯度效应及其响应机制尚不清楚，这极大地限制了对不同海拔梯度竹子养分利用、觅养机制和生态适应策略的阐释。为此，本文以福建省沙县粗放经营3个海拔梯度的苦竹林立竹为研究对象，测定了1-3年立竹叶片C、N、P含量，分析了不同海拔梯度苦竹叶片C、N、P化学计量特征及其异速增长关系，试图阐明以下问题：海拔梯度是否会影响苦竹林立竹叶片C、N、P含量及其化学计量特征，进而改变其相对异速增长关系？通过上述问题的研究与阐释，旨在分析提出试验区苦竹林丰产培育的适宜海拔梯度，为苦竹林生态化经营提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于福建省沙县夏茂镇（26°29′~26°40′ N、117°32′~117°46′ E）。年平均气温19.7 ℃，极端高温40.5 ℃，极端低温-8.2 ℃，年平均降水量1 531 mm(Guo et al., 2018)。土壤为红壤，土层厚度50 cm以上。该区域土地利用类型和植被分布海拔间差异较为明显，海拔200 m以下主要为农

田，海拔200~800 m以苦竹林为主，海拔800 m以上主要为针阔混交林。夏茂镇苦竹林资源丰富，面积超过800 hm^2，经营粗放，主要实施季节性留笋养竹和选择性伐竹措施，不进行林地垦复和施肥等措施。

1.2 试验调查方法

2018 年 11 月，在试验区选择 3 个海拔梯度，即(200±10) m（低海拔, Low altitude）、(400±10) m（中海拔, Middle altitude）、(800±10) m（高海拔, High altitude），分别设置 10 m×10 m 样地各 3 个，调查试验苦竹林立竹密度、立竹胸径、立竹年龄等林分结构状况(表 1)。在试验苦竹林每个样地中分别选取 1 年生、2 年生、3 年生标准竹各 5 株，齐地伐倒，取竹冠上、中、下部位健康成熟叶片各约 200 g，均匀混合后取样 200 g 左右。将叶片带回实验室，先 105 ℃杀青 30 min，然后 80 ℃烘至恒重，粉碎，研磨过 100 目筛，装袋储于真空干燥器中以备化学分析。叶片 C 含量采用重铬酸钾容量法测定，N、P 含量分别采用凯氏定氮法与钼锑抗比色法测定(郑淑霞和上官周平, 2006)。

表 1 试验苦竹林林分结构

Table1 Information for experiment *Pleioblastus amarus* stand structure

海拔 Altitude	立竹密度 Density ($stem·hm^{-2}$)	立竹胸径 Diameter at breast Height (cm)	立竹年龄结构 Age structure (1a:2a:3a)
低海拔 Low altitude	5280±165	3.82±0.16	3.52:4.33:2.15
中海拔 Middle altitude	4920±135	4.61±0.41	3.61:4.37:2.02
高海拔 High altitude	4515±105	4.24±0.68	3.41:4.18:2.41

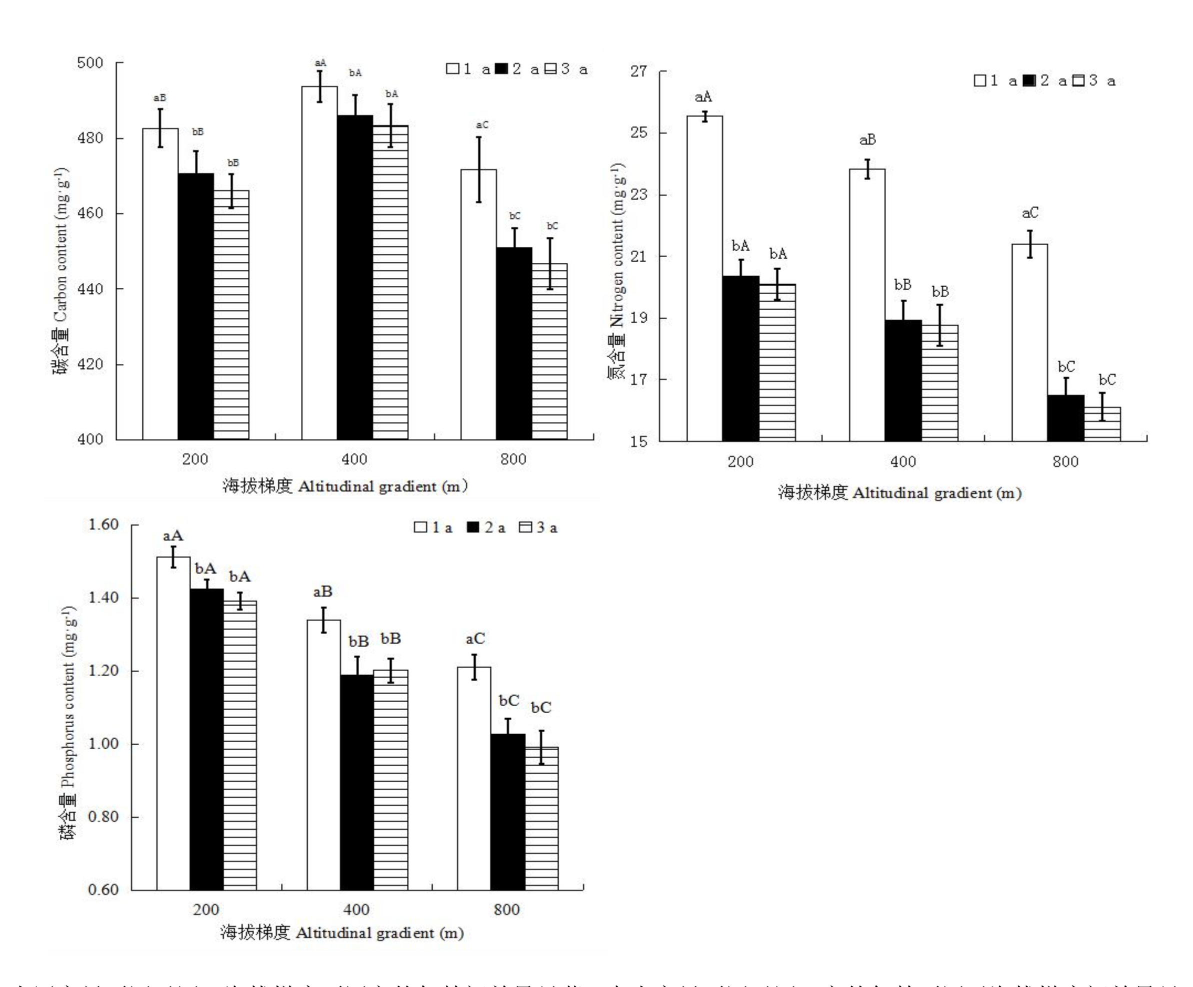
1.3 数据处理与分析

试验数据整理与作图在Excel 2003统计软件中完成。采用SPSS19.0统计软件的单因素方差分析(one-way ANOVA)来分析不同海拔梯度苦竹叶片碳、氮、磷含量及化学计量比的差异性。不同海拔梯度苦竹林叶片C、N、P异速增长用方程$Y=a×x^b$来描述，其中，b为异速生长指数。采用标准化主轴回归分析(Standardized Major Axis, SMA)计算异速增长指数b，并比较异速增长指数之间及其与1.0的差异性。SMA分析采用*R*语言的Smatr模块完成(Weiner, 2004; Warton et al., 2012)。显著性水平设定为α=0.05。试验数据为各个指标测定数据平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 不同海拔梯度苦竹林立竹叶片碳氮磷含量

随立竹年龄的增大，同一海拔试验苦竹林立竹叶片 C、N、P 含量总体上呈降低的变化趋势，1 年生立竹 C、N、P 含量均显著高于 2 年生、3 年生立竹，2 年生立竹 C、N、P 含量仅略高于 3 年生立竹，二者间无显著差异($P>0.05$)。随海拔梯度的升高，苦竹林同一年龄立竹叶片 C 含量呈先升高后降低的变化趋势，不同海拔梯度同一年龄立竹间差异显著($P<0.05$)；立竹叶片 N、P 含量均呈下降变化趋势，不同海拔梯度同一年龄立竹间差异显著($P<0.05$)(图 1)。



小写字母不同示同一海拔梯度不同立竹年龄间差异显著，大小字母不同示同一立竹年龄不同示海拔梯度间差异显著。下同。

Different lowercase letters indicate the significant differences (P< 0. 05) among bamboo ages under same altitude, then different capital letters indicate the significant differences (P< 0. 05)among altitudes with same bamboo ages. The same below.

图 1 不同海拔苦竹林立竹叶片碳、氮、磷含量

Fig 1. Concentration of leaf C, N, P of *Pleioblastus amarus* stand distributed in three different altitudes

2.2 不同海拔梯度苦竹林立竹叶片碳氮磷化学计量特征

由表 2 分析表明，随立竹年龄的增大，同一海拔试验苦竹林立竹叶片 C:N、C:P 总体上均呈升高趋势，N:P 总体上呈下降趋势，且 2 年生、3 年生立竹叶片 C:N、C:P、N:P 均无显著差异，但 C:N、C:P 均显著高于 1 年生立竹，而 N:P 显著低于 1 年生立竹。随海拔梯度的升高，试验苦竹林同一年龄立竹叶片 C:N、C:P 均呈升高趋势，且不同海拔梯度间差异显著(P<0.05)；立竹叶片 N:P 亦总体上呈升高趋势，且中海拔、高海拔苦竹林 2 年生、3 年生立竹间无显著差异，均显著高于低海拔竹林，而 1 年生立竹不同海拔梯度间无显著差异(P>0.05)。

表 2 不同海拔苦竹林立竹叶片碳氮磷化学计量比

Table 2 The ratios of leaf carbon, nitrogen and phosphorus of *Pleioblastus amarus* stand in three different altitudes

海拔 Altitude	立竹年龄(年) Bamboo age (a)	C:N	C:P	N:P
低海拔 Low altitude	1	19.06±1.03bC	318.94±11.07bC	16.88±1.01aA
	2	23.05±1.17aC	330.45±9.72aC	14.30±0.95bB
	3	23.21±1.2aC	334.91±10.22aC	14.43±0.53bB
中海拔 Middle altitude	1	20.72±1.15bB	368.68±12.73bB	17.80±0.63aA
	2	25.67±1.23aB	408.50±11.35aB	15.91±1.18bA
	3	25.75±0.96aB	402.22 ±9.18aB	15.62±1.03bA
高海拔 High altitude	1	22.05±0.77bA	389.49±13.98bA	17.66±1.04aA
	2	27.35±1.29aA	439.31±10.11aA	16.06±0.65bA
	3	27.71±1.31aA	450.57±12.15aA	16.26±0.83bA

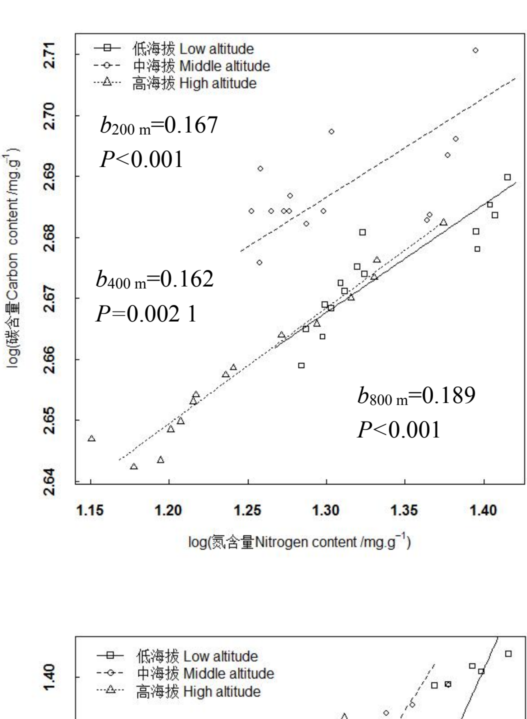
2.3 不同海拔梯度苦竹林立竹叶片碳氮磷异速增长关系

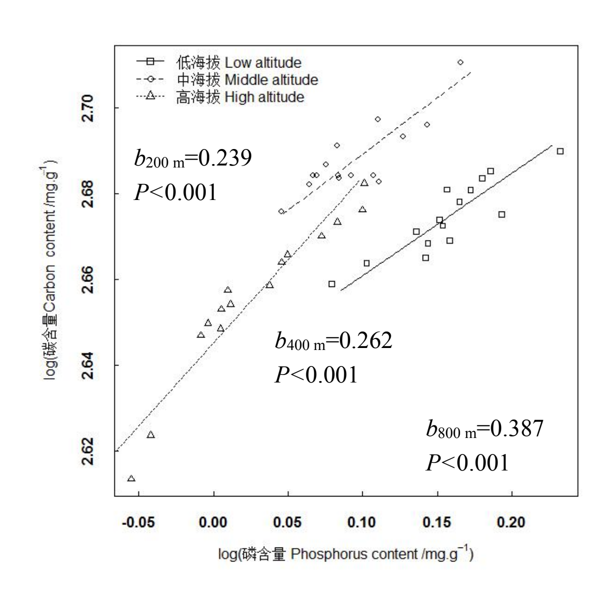
苦竹林立竹叶片 C、N、P 含量呈极显著(P<0.01)异速增长关系(b≠1)，其中叶片 C 与 N 异速增长指数为 0.162~0.189，C 与 P 异速增长指数为 0.239~0.387，N 与 P 异速增长指数为 1.368~2.267。随海拔梯度升高，苦竹林立竹叶片 C-N、C-P 异速增长指数均呈显著升高的变化趋势，也即随海拔梯度升高，单位 N、P 投入的 C 产出明显增加，苦竹林对 N、P 利用效率提高；立竹叶片 N-P 异速增长指数随海拔梯度的升高而显著下降，这可能是由于随海拔梯度升高 2-3 年生立竹叶片 N:P 明显升高，P 素限制性作用增强，从而导致其异速增长指数的显著下降(图 2)。

3 讨论与结论

海拔差异通常会导致气温、降水、光照和土壤性状等生态因子发生明显的改变，形成特定的生境，进而对植物叶片养分化学计量特征产生明显的影响(姜沛沛等, 2017)。本研究结果表明，苦竹林立竹叶片碳、氮、磷含量为 446.62~493.67 mg·g^{-1}、16.12~25.54 mg·g^{-1} 和 0.99~1.51 mg·g^{-1}，均值分别为 472.41 mg·g^{-1}、20.17 mg·g^{-1} 和 1.25 mg·g^{-1}，均低于全国毛竹（*Phyllostachys edulis*）林叶片碳(478.30 mg·g^{-1})、氮(22.2 mg·g^{-1})、磷(1.90 mg·g^{-1})含量的平均水平(杜满义等, 2016)，这可能与苦竹较低的生物量积累及良好生长较少的养分需求有关。随立竹年龄的增大，苦竹林立竹叶片碳、氮、磷含量总体上均呈降低的变化趋势，1 年生立竹碳、氮、磷含量均显著高于 2 年生、3 年生立竹，这可能是由于 1 年生立竹形态建成与抽枝展叶对碳需求巨大的拉动作用，从而动员更多的碳同化物通过竹鞭由母竹(2 年生、3 年生立竹)向其传输，而较高的氮、磷含量有可能是由于新竹生长较弱，氮、磷利用率较低，从而引起对氮、磷的奢侈吸收有关。随海拔梯度的升高，苦竹林立竹叶片碳含量呈先显著升高后明显下降的变化趋势，中海拔梯度苦竹林立竹叶片碳含量最高，因而体现了较强的光合碳同化能力，这与 Guo 等中海拔苦竹叶片形态塑性和功能性状最优的研究结果一致(Guo et al., 2018)。随海拔梯度的升高，苦竹林立竹叶片氮、磷含量均呈显著下降趋势，这说明海拔升高，苦竹林土壤养分含量，特别是养分生物有效性明显下降(张亿艳, 2019)，苦竹生长可获得 N、P 的量降低，加之温度降低、辐射增强、二氧化碳分压下降等非生物胁迫增强，抑制了苦竹对养分的吸收，从而在一种程度上导致立竹叶片氮、磷含量显著下降。这说明，

海拔梯度对苦竹林立竹叶片碳、氮、磷含量产生了重要影响，中海拔苦竹林立竹叶片碳含量最高，体现了较强的光合碳同化能力和生产潜力，是试验区苦竹丰产林培育的适宜海拔梯度。





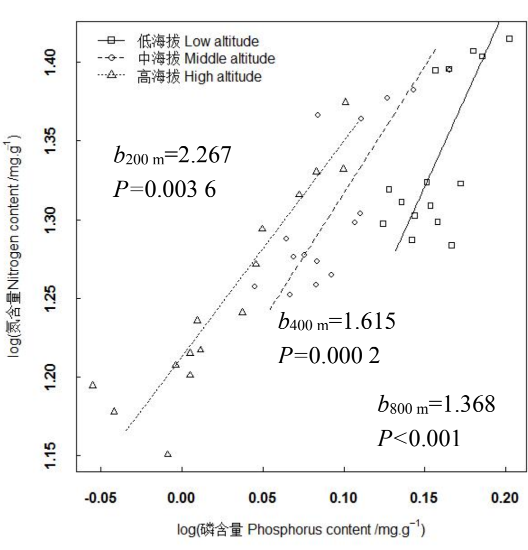


图 2 不同海拔梯度苦竹林立竹叶片碳氮磷异速增长关系

Fig. 2 The allometric growth of leaf carbon, nitrogen and phosphorus of *Pleioblastus amarus* stand at different altitudes

植物叶片 C:N、C:P 意味着植物吸收营养所能同化 C 的能力，在一定程度上反映了植物的养分利用效率，因而具有重要的生态学意义(黄建军和王希华, 2003)。本研究中，苦竹叶片 C:N:P 为 377:16:1，低于众多竹子综合研究的结果(380:16:1)(杨清培等, 2016)，且 2 年生、3 年生立竹叶片 C:N、C:P 均显著高于 1 年生立竹，而 N:P 则相反，这说明 2 年生、3 年生立竹具有更高的 N、P 利用效率，单位 N、P 投入产出的 C 较高，因而受养分限制，特别是 N 素限制更加明显。随海拔

梯度的升高，试验苦竹林同一年龄立竹叶片 C:N、C:P、N:P 总体上均呈升高的变化趋势，这说明海拔梯度升高，苦竹 N、P 利用效率提高。海拔升高后，土壤养分含量和生物有效性均明显下降，高海拔下苦竹为了保持较高的光合碳同化能力，势必提高 N、P 利用效率。低海拔、中海拔苦竹林 2 年生、3 年生立竹叶片 N:P 在 14~16 之间，受 N、P 共同限制，而高海拔苦竹林立竹叶片 N:P>16，主要受 P 限制(Güsewell et al., 2003)。这说明海拔梯度不仅对苦竹叶片碳、氮、磷含量产生了重要影响，还改变了其化学计量特征，导致养分限制格局发生明显改变，苦竹可能通过改变叶片碳、氮、磷含量，调节其化学计量特征来适应海拔梯度引起的生态因子、养分有效性和环境胁迫的变化。因此，在苦竹丰产林经营中，中、低海拔不仅要补充氮、磷，且需要考虑 N、P 养分元素的平衡施用，而高海拔苦竹林则宜增施磷肥。苦竹林立竹叶片碳、氮、磷均呈显著的正异速增长关系，随海拔梯度的升高，叶片 C-N、C-P 异速增长指数显著升高，这表明单位氮、磷投入的碳产出增加，这与海拔升高氮、磷利用率升高的研究结果一致，而叶片 N-P 异速增长指数下降，这也在一定程度上佐证了高海拔磷素限制性作用增强的研究结果。

综合分析表明，海拔对苦竹林立竹叶片碳氮磷化学计量特征及其异速增长关系会产生重要的影响，试验区中海拔苦竹林具有较强的碳同化能力和较高的 N、P 利用效率，具有较强的生产潜力。同时，我们前期研究结果表明，中海拔苦竹林立竹叶片形态塑性、功能性状(Guo et al., 2018)和竹笋外观、营养和食味品质均优于其他海拔梯度(郭子武等, 2019)，是试验区苦竹林丰产培育的适宜海拔。

参考文献：

ALLEN AP, GILLOOLY JF, 2009. Towards an integration of ecological stoichiometry and the metabolic theory of ecology to better understand nutrient cycling [J]. Ecol Lett, 12 (5): 369-384.

AMATANGELO KL and VITOUSEK PM, 2008. Stoichiometry of ferns in Hawaii: implications for nutrient cycling [J]. Oecologia, 157: 619-627.

DU MY, FAN SH, LIU GL, et al, 2016. Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in *Phyllostachys edulis* forests of China [J]. Chin J Plant Ecol, 40(8): 760-774. [杜满义, 范少辉, 刘广路, 等, 2016. 中国毛竹林碳氮磷生态化学计量特征 [J]. 植物生态学报, 40(8): 760-774.]

ELSER JJ, BRACHEN, CLELAND EE, et al, 2007. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems [J]. Ecol Lett, 10(12): 1135–1142.

FANG W, LIN XC, HONG P, et al, 2005. Rhythm of growth and development of *Pleioblastus amarus* [J]. J Zhejiang A & F Univ, 22(1): 1-5. [方伟, 林新春, 洪平, 等, 2005. 苦竹生长发育规律研究 [J]. 浙江林学院学报, 22(1): 1-5.]

GUO ZW, LIN H, CHEN SL et al., 2018. Altitudinal patterns of leaf traits and leaf allometry in bamboo *Pleioblastus amarus* [J]. Front Plant Sci, 9:1110.doi: 10.3389/fpls.2018.01110

GUO ZW, YANG LT, LIN H, et al, 2019. Effects of altitude on the variation of appearance, nutrition, and taste for bamboo shoots of *Pleioblastus amarus* in Shaxian, Fujian Province [J]. Chin J Ecol, 38(1): 89-94. [郭子武, 杨丽婷, 林华, 等, 2019. 沙县苦竹笋外观、营养和食味品质变异的海拔效应 [J]. 生态学杂志, 38(1): 89-94.]

GÜSEWELL S, KOERSELMAN W, VERHOVEVEN JTA, 2003. Biomass N:P ratios as indicators of nutrient limitation for plant populations in wetlands [J]. Ecol Appl, 13, 372-384.

HUANG JJ， WANG XH, 2003. Leaf nutrient and structural characteristics of 32 evergreen broad-leaved species [J]. J East Chin Nor Univ (Nat Sci Ed), 1: 92-97. [黄建军，王希华, 2003. 浙江天童32种常绿阔叶树叶片的营养及结构特征 [J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1: 92-97.]

JI MF, YAO HH, ZHANG XW, 2017. C, N and P ecological stoichiometry of two bryophyte plants in Baotianman Nature Reserve [J]. Guihaia, 37(2): 204-210. [姬明飞, 姚航航, 张晓玮, 2017. 宝天曼自然保护区两种优势藓类植物 C、N、P 生态化学计量特征研究 [J]. 广西植物, 37(2): 204-210.]

JIANG JM, FEI SM, LI JY, et al, 2007. The distribution of main nutrient elements in the organs of *Pleioblastus amarus* and the nutrient output of its harvesting [J]. J Sichuan For Sci & Technol, 28(2): 15-19. [蒋俊明, 费世民, 李吉跃, 等, 2007. 苦竹各器官主要营养元素分布及采伐的养分输出 [J]. 四川林业科技, 28(2): 15-19.]

JIANG PP, CAO Y, CHEN YM, et al., 2017. N and P stoichiometric characteristics of leaves, litter, and soil for three dominant tree species in the Shaanxi Province [J]. Acta Ecol Sin,, 37(2): 443-454. [姜沛沛, 曹扬, 陈云明, 等, 2017. 陕西省3种主要树种叶片、凋落物和土壤N、P化学计量特征 [J]. 生态学报, 37(2): 443-454.]

KÖRNER C, 2007. The use of altitude in ecological research [J]. Trends Ecol Evol, 22: 569-574.

LI HL, GONG L, HONG Y, 2016. Seasonal variations in C, N, and P stoichiometry of roots, stems, and leaves of *Phragmites australis* in the Keriya Oasis, Xinjiang, China [J]. Acta Ecol Sin, 36(20): 6547-6555. [李红林, 贡璐, 洪毅, 2016. 克里雅绿洲旱生芦苇根茎叶 C、N、P 化学计量特征的季节变化 [J]. 生态学报, 36(20): 6547-6555.]

LIN H, CHEN SL, GUO ZW, et al, 2017. Allometric relationship among leaf traits in different stand density of *Pleioblastus amarus* [J]. Fort Res, 30(4): 617-623. [林华, 陈双林, 郭子武, 等, 2017. 苦竹叶片性状及其异速生长关系的密度效应 [J]. 林业科学研究, 30(4): 617-623.]

OU Z, XIE P, GONG HD, et al, 2014. Soil nutrient characteristics of rhododendron communities at different altitudes in Yunnan [J].Guihaia, 34(5): 651-656. [区智, 解璞, 巩合德, 等, 2014. 云南杜鹃群落不同海拔土壤养分状况分析 [J]. 广西植物, 34(5): 651-656.]

READ QD, MOORHEAD LC, SWENSON NG, et al, 2014. Convergent effects of elevation on functional leaf traits within and among species [J]. Funct Ecol, 28: 37-45.

SOETHE N, LEHMANN J, ENGELS C, 2008. Nutrient availability at different altitudes in a tropical montane forest in Ecuador [J]. J Trop Ecol, 24:397-406.

TESSIER JT and RAYNAL DJ, 2003. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation [J]. J Appl Ecol, 40, 523-534.

WARTON DI, DUURSMA RA, FALSTER DS, et al, 2012. SMATR 3– an R package for estimation and inference about allometric lines[J]. Methods Ecol Evol, 3(2): 257- 259.

WEINER J, 2004. Allocation, plasticity and allometry in plants [J]. Persp Plant Ecol, Evol Syst, 6: 207-215.

YANG QP, OUYANG M, YANG GY, et al, 2016. Research on ecological stoichiometry in bamboos: from biological basis to applications in silviculture of bamboo forests [J]. Chin J Plant Ecol, 40(3): 264-278. [杨清培, 欧阳明, 杨光耀, 等, 2016. 竹子生态化学计量学研究: 从生物学基础到竹林培育学应用 [J]. 植物生态学报, 40(3): 264-278.]

ZHANG TT, LIU WY, HUANG JB, et al., 2019. Characteristics of plant ecological stoichiometry homeostasis [J]. Guihaia, 39(5): 701-712. [张婷婷, 刘文耀, 黄俊彪, 等. 植物生态化学计量内稳性特征 [J]. 广西植物, 2019, 39(5): 701-712.]

ZHANG YY, 2019. Effect of altitudinal gradient on content and stoichiometry of soil nutrient in *Pleioblastus amarus* stands [J]. J Bam Res, 38(3): 34-38. [张亿艳, 2019. 苦竹林土壤养分含量及其化学计量特征的海拔效应 [J]. 竹子学报, 38(3): 34-38.]

ZHENG SX, SHANGGUAN ZP, 2006. Spatial patterns of leaf nutrient composition of the plants in the Loess Plateau of China [J]. Progr Nat Sci,16(8): 965-973. [郑淑霞, 上官周平, 2006. 黄土高原地区植物叶片养分组成的空间分布格局 [J]. 自然科学进展, 16(8): 965-973.]

ZHENG RM, ZHENG YS, DING MF, et al. , 2003. Study on the biomass model of *Pleioblastus amarus* [J]. J Fujian Coll For, 23(1): 61-64. [郑容妹, 郑郁善, 丁闽锋, 等, 2003. 苦竹生物量模型的研究 [J]. 福建林学院学报, 23(1): 61-64.]